УДК 621.3.048

## ИМПУЛЬСНЫЕ РАЗРЯДЫ В ВАКУУМЕ И ГАЗАХ. (Достижения высоковольтников ТПУ за 60 лет)

В.Я. Ушаков

Томский политехнический университет
E-mail: rcr@tpu.ru

*Обобщены основные результаты исследования механизма импульсного пробоя технического вакуума в больших промежутках, а также электрической прочности вакуума и сжатых газов при разряде в их объеме и по поверхности твердых диэлектриков. Приведены основные параметры высоковольтных элементов, разработанных в ТПИ (ТПУ) на основе этих результатов: электронной пушки сильноточного ускорителя на 3 МэВ, электроразрядного $CO_2$-лазера, обостряющего газонаполненного разрядника на напряжение 3 МВ.*

### Введение

Официальной датой рождения в Томске научной школы по высоковольтной технике следует считать дату основания в Томском политехническом институте кафедры «Техника высоких напряжений» – 12 марта 1946 г. Одним из основных направлений научных исследований и технологических разработок представителей этой школы было создание научных основ проектирования и эксплуатации изоляции высоковольтного оборудования и технологических применений электрического разряда в качестве «рабочего института». При этом приоритет был отдан высоковольтной импульсной технике и, соответственно, проблемам поведения диэлектрических материалов и сред при воздействии сильных импульсных электрических полей, а также природе и характеристикам импульсных электрических разрядов.

Основные результаты этих исследований обобщены в ряде монографий сотрудников кафедры техники высоких напряжений (ТВН) и НИИ высоких напряжений [1–11] и в трудах конференций, проведенных, в том числе, в Томском политехническом институте [12, 13]. Частично они отражены в исторических очерках [14, 15]; более подробно – в специальном выпуске журнала «Известия вузов. Физика» [16], посвященном 100-летию со дня основания Томского политехнического университета.

### 1. Вакуумные разряды и изоляция

Исследования электрического пробоя вакуума на кафедре ТВН начаты Г.М. Кассировым в 1961 г. и были ориентированы на изучение изоляционных характеристик вакуума при воздействии высоковольтных импульсов микро- и наносекундной длительности. Необходимо отметить, что работы по наносекундному пробою вакуума были, фактически, пионерными. Непосредственным стимулом для начала этих работ послужили первые обнадеживающие результаты реализации идеи А.А. Воробьева, Г.А. Воробьева, А.Т. Чепикова [17] использовать импульсный разряд в твердых непроводящих материалах для бурения скважин и разрушения (дезинтеграции) минералов и искусственных материалов. Наряду с жидкостями и сжатыми газами, вакуум рассматривался как потенциальная среда для реализации этих процессов. Установленные в экспериментах низкие значения напряжения пробоя по поверхности твердых диэлектриков в вакууме даже при воздействии коротких импульсов напряжения с одной стороны, показали бесперспективность этого направления поисков, а с другой, показали, что перекрытия по поверхности твердого диэлектрика, как неотъемлемого компонента несущей конструкции высоковольтных вакуумных установок, ограничивают уровень рабочих градиентов.

Открытие явления взрывной эмиссии электронов [18], достижения в области газовых и вакуумных разрядов, электротехники, техники высоких напряжений, изоляционной техники обеспечили выдающиеся успехи в сооружении и применении сильноточных ускорителей электронов прямого действия (СЭУ). Стремление снизить массогабаритные показатели СЭУ, повысить эффективность их работы обусловливает форсированные режимы работы электрической изоляции. Применительно к вакуумному промежутку диода ускорителя этот

режим работы не может быть ослаблен в принципе из-за необходимости реализации взрывной эмиссии электронов с катода. Тяжелые условия работы изоляции СЭУ, необходимость повышения ее надежности и сроков службы стимулировали всплеск интереса во многих научных центрах к проблеме повышения электрической прочности вакуумной изоляции в мегавольтном диапазоне, которая среди других изоляционных систем СЭУ является наиболее слабым звеном. После более чем десятилетней паузы работы по импульсному пробою вакуума в ТПИ были возобновлены в начале 70-х гг. Г.М. Кассировым и сотрудниками созданной им в НИИ ВН лаборатории (Г.В. Смирнов, А.А. Емельянов, Ф.Г. Секисов, Г.П. Кокаревич, В.И. Фель, А.Я. Филатов, Б.К. Ясельский, В.Н. Чекрыгин).

Эти исследования были ориентированы на изучение физического механизма вакуумных разрядов в больших (сантиметровых) вакуумных промежутках в техническом вакууме, а также на получение разрядных (электропрочностных) характеристик вакуумных промежутков, в том числе по поверхности твердых диэлектриков. Прикладная часть работ включала разработку, изготовление, испытание различных конструкций вакуумных секционированных изоляторов электронных пушек (диодов) СЭУ микросекундного диапазона на напряжение до 3 МВ, разработку методов кондиционирования (тренировки) этих устройств и методов их расчета.

Для решения этих задач были созданы вакуумные испытательные стенды на напряжение до 3 МВ, оснащенные необходимой измерительной и диагностической аппаратурой (осциллографы, масс-спектрометры, спектрографы и др.).

За два десятилетия в лаборатории были получены важные результаты, которые, согласно [19], можно сформулировать следующим образом.

1. Установлены отсутствие запаздывания разрядного процесса относительно фронта высоковольтного импульса даже при минимальных перенапряжениях и наличие двух стадий роста тока – линейной и экспоненциальной.
2. Экспоненциальный рост тока на фронте микроразряда в диапазоне пяти порядков в техническом вакууме обусловлен возникновением в приэлектродных зонах динамических областей повышенного давления газов и развитии в них ионизационных процессов, носящих объемный характер. Ионизационные процессы более интенсивны у катода, что указывает на определяющую роль катодных явлений в формировании импульсных высоковольтных разрядов в вакууме.
3. При достижении в микроразряде плотности тока на катоде порядка 0,2 А/см$^2$, разрядный процесс переходит в стадию быстрого необратимого роста тока вследствие взрыва неоднородностей катодной поверхности, возникновения факелов металлической плазмы и взрывной эмиссии электронов. Впервые установлено, что микроразряды подготавливают условия для возникновения взрывной эмиссии электронов и участвуют в инициировании пробоя технического вакуума.
4. Обнаружен минимум импульсной электрической прочности больших вакуумных промежутков при длительности высоковольтных импульсов в несколько десятков мкс в слабонеоднородном поле (40...50 кВ/см), вызванный наиболее благоприятными условиями развития газодинамических и ионизационных процессов в вакуумном промежутке.
5. Зависимость электрической прочности сантиметровых промежутков в техническом вакууме от давления остаточных газов в области давлений $10^{-3}$...$10^{-2}$ Па наиболее отчетливо проявляется при больших площадях поверхности электродов и при времени воздействия напряжения в десятки и сотни микросекунд, то есть в тех условиях, когда длительность импульса совпадает с характерными временами теплового движения в промежутке десорбированного с электродов газа.
6. С учетом участия газодинамических процессов, развивающихся при пробое технического вакуума, и условий эвакуации десорбированных газов из области сильного электрического поля дано качественное объяснение «эффекту полного напряжения» и «эффекту площади электродов».
7. Пробой (перекрытие) по поверхности твердого диэлектрика в вакууме в основных чертах аналогичен таковому для вакуумных промежутков. Развитию пробоя при напряженности поля в несколько раз меньшей, чем в вакуумных промежутках и за более короткое время способствуют десорбированные с поверхности диэлектрика газы и затрудненные условия их эвакуации из области сильного электрического поля.
8. В катодном контакте металл-диэлектрик задолго до пробоя возникают плазменные образования, которые, как и при пробое вакуумных промежутков, указывают на решающее влияние при поверхностном пробое катодных процессов.
9. Разработаны, изготовлены и смонтированы в уникальные ускорители вакуумные секционированные изоляторы на 3 МВ для работы в микросекундном диапазоне длительностей высоковольтных импульсов. Длительная и интенсивная эксплуатация этих устройств показала их высокую надежность, рис. 1.
10. Предложена конструкция вакуумного изолятора с глубокой деформацией электрического поля, способного при мегавольтном напряжении и длительности импульсов 0,5 мкс работать при напряженностях электрического поля до 40 кВ/см. Эффект достигнут за счет резкого увеличения неоднородности поля на части потенциальных элементов ради повышения электрической прочности конструкции в целом.



***Рис. 1.*** *Корпус электронной пушки на 3 МВ с секционированной полиэтиленовой изоляцией и принудительным выравниваем распределения напряжения*

Поиск в последние годы сфер технологического применения знаний и опыта, накопленных при исследовании механизма пробоя вакуума в больших разрядных промежутках, при разработке высоковольтных вакуумных конструкций привел к разработке в НИИ ВН (Г.А. Кассиров, Ф.Г. Секисов, О.В. Смердов) способа сушки древесины в поле электрического разряда при пониженном давлении. Показано, что этот разряд устойчиво горит в межэлектродном промежутке, содержащем древесину, при давлении $10^{-3}...10^{-1}$ МПа, напряжении 15 кВ и влажности древесины: 40...50 % (постоянное напряжение), 30...40 % (переменное напряжение частотой 50 Гц), 15...20 % (импульсы длительностью $2\cdot10^{-7}...4\cdot10^{-5}$ с). Эта технология позволяет в 2...10 раз сократить время сушки по сравнению с конвективной, и является наиболее экономически эффективной для сушки материалов толщиной более 60 мм.

### 2. Газовый разряд и газоразрядные устройства и технологии

Как отмечено выше, на первых этапах разработки электроимпульсной технологии газы под давлением рассматривались как одна из возможных сред, в которой осуществляется технологический процесс – внедрение разряда в твердое тело и последующее расширение канала, сопровождающееся формированием ударных волн. Были исследованы вольтсекундные характеристики воздуха, газовых смесей и паров при повышенных давлениях и температурах [12]. После того как стало ясно, что наиболее подходящей рабочей и шламоудаляющей средой являются жидкости, включая воду, интерес к пробою газов на каф. ТВН и в НИИ ВН был исчерпан. Он вновь возник в конце 60-х – начале 70-х гг. прошлого века в связи с развитием мощной импульсной энергетики.

Одним из ответственных элементов источников высоковольтных импульсов большой мощности является коммутатор, который в значительной мере определяет КПД источника, точность синхронного его включения с другими источниками, а также мощность, развиваемую на объекте. В зависимости от конкретных применений, в качестве изолирующей и рабочей среды целесообразно использовать газы, жидкости или твердые диэлектрики. Поскольку газы и газовые смеси под повышенным давлением обладают рядом достоинств как среда для искровых коммутаторов, в течении двух десятилетий сотрудники НИИ ВН и аспиранты каф. ТВН под руководством Г.С. Коршунова выполняли исследования и разработки, основными результатами которых являются:

- большой объем фактического материала по электрической прочности газов и газовых смесей в зависимости от основных влияющих факторов: давления, состава смеси, конструкции межэлектродного промежутка, параметров электродов и состояния их поверхности, наличия в промежутке твердой изоляции и положения ее поверхности относительно силовых линий поля, параметров импульсов напряжения;
- способы повышения точности управляемого запуска газовых разрядников за счет оптимизации конструкций разрядников и параметров «поджигающего» импульса, а также размещением в тригатронном узле (узле поджига) твердых изоляторов (втулок);
- методики расчета и проектирования секционированных изоляционных корпусов разрядников на напряжение в несколько МВ;
- управляемые искровые коммутаторы на напряжение до 3 МВ, коммутируемые токи до сотен кА со стабильностью запуска в ед. нс и временем коммутации около 10 нс, рис. 2.

Материалы опубликованы в десятках статей и обобщены в кандидатских диссертациях Ю.Ф. Свиридова (1972 г.), М.Т. Пичугиной (1978 г.), С.Б. Евлампиева (1984 г.), В.В. Устюжина (1987 г.)

Примерно в это же время – в середине 70-х гг. – под руководством Б.В. Семкина и Б.Г. Шубина в НИИ ВН были начаты работы по мощным импульсным газоразрядным $CO_2$-лазерам в кооперации с институтом общей физике АН СССР (ИОФ АН). Общее руководство работами осуществлял директор ИОФ АН лауреат Нобелевской премии, академик А.М. Прохоров. Накопленный томскими высоковольтниками опыт исследований

разрядных явлений в различных диэлектриках позволил и в этой, новая для ТПИ, отрасли науки добиться впечатляющих результатов. Если на начальных этапах этих работ институт ограничивался, в основном, разработкой и изготовлением источников накачки $CO_2$-лазеров, то с 1981 г. НИИ ВН приступил к разработке и изготовлению самих лазеров.

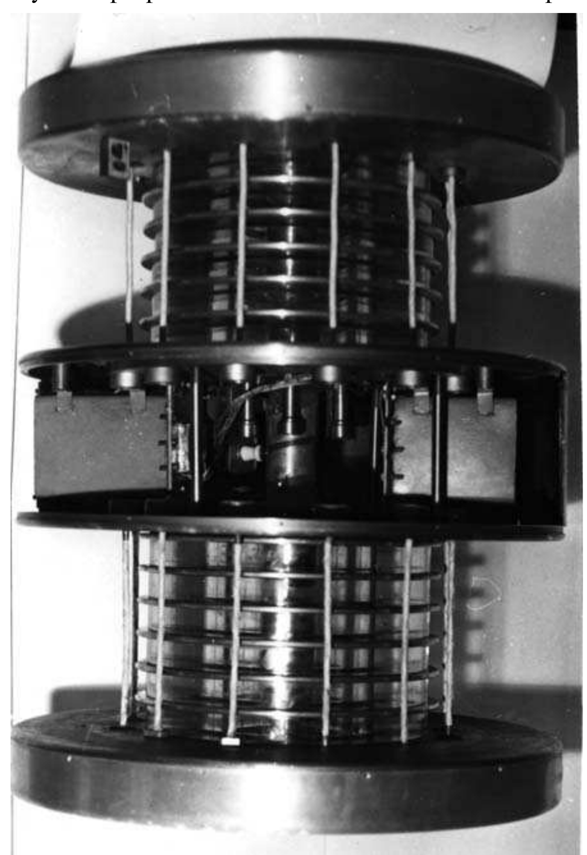


***Рис. 2.*** *Управляемый газонаполненный обостряющий разрядник на 2,5 МВ*

Потребовалось изучение природы и характеристик объемного самостоятельного разряда в газовых смесях на основе $CO_2$ при атмосферном давлении, разработка высокоэффективных предыонизаторов, оригинальных схем накачки, способов повышения коэффициента использования объема рабочей смеси на основе новых принципов формирования объемного разряда. В 1984 г. в институте запущен лазер с энергией излучения до 3 кДж и рекордной на то время апертурой излучения, рис. 3, в 1987 г. – действующий макет лазера с объемом рабочей смеси 320 л, межэлектродным расстояние до 50 см и энергией излучения до 10 кДж. В 1988 г. получен объемный разряд в межэлектродном промежутке 70 см, что примерно вдвое превосходит этот параметр у действующих лазеров. Результаты этих исследований и разработок представлены в многочисленных статьях и авторских свидетельствах, а также в кандидатских диссертациях аспирантов каф. ТВН Е.Ф. Трефилова (1988 г.) и В.Р. Миненкова (1990 г.).

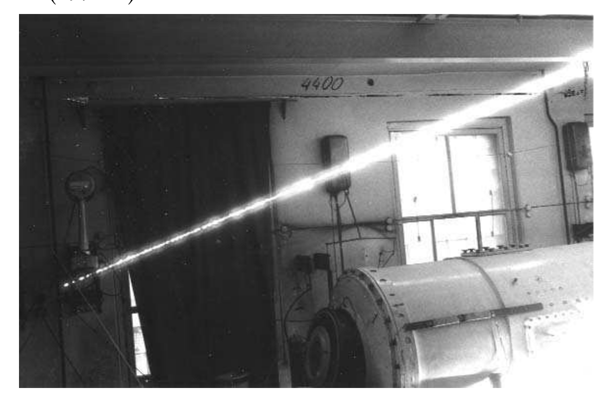



***Рис. 3.*** *Импульсный электроразрядный $CO_2$-лазер и инициированная им четочная лазерная искра протяженностью более 4,5 м*

В начале 80-х годов в НИИ ВН были начаты поиски эффективных путей использования в технологиях не только бризантного действия электрических разрядов, но и ряда других интенсивных возмущений, таких как: высокие температуры излучения в широком диапазоне длин волн, генерирования активных частиц (O, $O_3$, OH). Эти поиски завершились разработкой и патентованием способа и устройства обработки питьевой воды с помощью наносекундных барьерных разрядов в водо-воздушном потоке [20]. После такой обработки вода легко очищается фильтрованием от неорганических и органических примесей. По эффективности эта технология превосходит все известные безреагентные способы очистки воды. Технически идея воплощена в водоочистном комплексе «Импульс», выпускаемом опытным производством НИИ ВН малыми сериями, а научные основы отражены в ряде отечественных и зарубежных публикаций авторского коллектива и обобщены в кандидатской диссертации Я.И. Корнева (2005 г.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А.А., Завадовская Е.К. Электрическая прочность твердых диэлектриков. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 312 с.
2. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. – М.: Высшая школа, 1966. – 224 с.
3. Воробьев А.А., Бортник И.М., Ушаков В.Я., Борин Б.М., Арсон А.Г. Газы с высокой электрической прочностью. – М.: ВИНИТИ, 1968. – 82 с.
4. Воробьев А.А., Воробьев Г.А., Завадовская Е.К. и др. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. – Томск: Изд-во ТГУ, 1971. – 225 с.
5. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. – Томск: Изд-во ТГУ, 1975. – 256 с.
6. Ушаков В.Я. Электрическое старение и ресурс монолитной полимерной изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 152 с.
7. Боев С.Г., Ушаков В.Я. Рациональное накопление заряда в диэлектриках и методы его диагностики. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
8. Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
9. Куртенков Г.Е. Основы проектирования изоляции высоковольтного электрооборудования. – Томск: Изд-во НТЛ, 1999. – 276 с.

10. Ushakov V.Ya. Insulation of High-Voltage Equipment. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. – 421 p.
11. Ушаков В.Я., Климкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении / Под ред. В.Я. Ушакова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 488 с.
12. Пробой диэлектриков и полупроводников // Сб. докл. IV Межвуз. научной конф. по пробою диэлектриков и полупроводников. – Февраль 1963 г., Томск. – М.: Энергия, 1964. – 22–23 с.
13. Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция // Сб. докладов Межвуз. научно-техн. конф. – Сентябрь 1967 г., Томск. – М.: Энергия, 1970. – 334 с.
14. Становление и развитие научных школ Томского политехнического университета: Исторический очерк / Под ред. Ю.П. Похолкова, В.Я. Ушакова. – Томск: Изд-во ТПУ, 1996. – 249 с.
15. Андронов Л.И., Беляев С.А., Бугаев С.П. и др. Сибирская энергетическая школа / Под ред. Н.А. Вяткина, В.Я. Ушакова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2001. – 232 с.
16. Известия вузов. Физика. – 1996. – № 4. – 177 с.
17. Свид. на открытие № 122 РФ. Закономерность пробоя твердого диэлектрика на границе разряда с жидким диэлектриком при воздействии импульса напряжения / А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев, А.Т. Чепиков. Приоритет от 14.12.1961; Опубл. 27.07. 1999
18. Диплом на открытие № 176 РФ. Явление взрывной эмиссии электронов / С.П. Бугаев, П.Н. Воронцов-Вельяминов, А.М. Искольдский, Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский, Г.Н. Фурсей. Опублик. 1976. Б.И. № 41. – С. 1.
19. Кассиров Г.М. Изоляционные свойства технического вакуума при мегавольтном уровне напряжения: Автореф. дис. ... докт. тех. наук. – Томск, 1992. – 37 с.
20. Пат. 2136600 РФ. МКИ$^6$ C02F 1/46, 7/00. Реактор и способ очистки воды / С.Г. Боев, В.М. Муратов, Н.П. Поляков, Н.А. Яворовский. Заяв. 16.12.97; Опубл. 10.09.99. Бюл. № 25. – 4 с.: ил.

УДК 537.525